

玛依湖保护区生态环境质量时空变化及驱动因素分析

李肖遥^{1,2}, 岳春芳^{1,2*}, 王庆杰^{1,2}, 张 琴^{1,2}

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要:科学评估生态环境质量,明晰其空间分异驱动因素,是改善区域生态环境和维护区域生态安全的重要前提。基于2000—2020年遥感影像数据计算玛依湖保护区遥感生态指数(RSEI),采用Mann-Kendall检验方法,确定研究期间的典型年份,进而分析生态环境质量时空变化特征,最后采用空间自相关方法、地理探测器模型探讨了生态环境质量空间相关性及其变化潜在驱动因子。结果表明,1)2000—2020年玛依湖保护区遥感生态指数均值呈波动上升趋势,2009年处于最低值为0.28;由突变检验确定,2013年为研究期间的突变点;各典型年份,生态环境质量空间上呈现“中间高、四周低”的分布格局,其中2009年,中湖区和下湖区生态环境质量等级以下降为主,但总体上看,近20a来保护区生态环境质量得到了改善。2)全局莫兰特指数(Moran's I)0.64~0.71,研究区生态环境质量之间存在较强的正相关关系,其空间分布呈簇状,高-高聚集区分布在保护区中央,低-低聚集区分布在保护区四周,并且近20a高-高聚集区域面积有扩张的趋势。3)地理探测器探测结果表明,除模型因子绿度和干度对生态环境质量变化有较大的影响外,土地利用对生态环境质量变化的影响越来越大。

关键词:玛依湖保护区;生态环境质量;Mann-Kendall检验;莫兰特指数(Moran's I);地理探测器模型
中图分类号:S718.56 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2024)01-0019-09

Spatiotemporal Variation and Driving Factors of Ecological Environment Quality in Mayi Lake Nature Reserve

LI Xiao-yao^{1,2}, YUE Chun-fang^{1,2*}, WANG Qing-jie^{1,2}, ZHANG Qin^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
2. Xinjiang Key Laboratory of Water Resources Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract: Scientifically evaluating the quality of ecological environment and clarifying its driving factors of spatial differentiation are important prerequisites for improving regional ecological environment and maintaining regional ecological security. In this study, the remote sensing ecological index (RSEI) of Mayi Lake Nature Reserve was calculated based on remote sensing image data from 2000 to 2020. The Mann-Kendall test method was used to determine the typical years during the study period, and then the spatial and temporal variation characteristics of ecological environment quality were analyzed. Finally, the spatial autocorrelation method and geographical detector model were used to explore the spatial correlation of ecological environment quality and its potential driving factors. The results showed that 1) from 2000 to 2020, the mean value of remote sensing ecological index of the reserve showed a fluctuating upward trend, and the lowest value (0.28) was in 2009. In each typical year, the ecological environment quality showed a spatial distribution pattern of "high in the middle and low around". In 2009, ecological environment quality grade of Zhonghu District and Xiahu District decreased mostly, but on the whole, the ecological environment

收稿日期:2022-11-15 修回日期:2023-03-15

基金项目:国家自然科学基金(51569032)。

第一作者:李肖遥。研究方向:水文学及水资源。E-mail:lixiaoyaoju@sina.com

* 通信作者:岳春芳,教授,博士生导师。研究方向:水资源管理。E-mail:mycf12@sina.com

quality of the reserve had been improved in the past 20 years. 2) The global Moran's I was between 0.64 and 0.71. There was a strong positive correlation between the ecological environment quality in the study area, and its spatial distribution was clustered. The high-high accumulation area was distributed in the center of the reserve, and the low-low aggregation area was distributed around the reserve. In the past 20 years, the area of high-high aggregation area had been expanding. 3) The detection results of geographical detector showed that the influence of land use on the change of ecological environment quality was increasing except that the greenness and dryness of model factors had great influence on the change of ecological environment quality.

Key words: Mayi Lake Nature Reserve; ecological environment quality; Mann-Kendal test; Moran's I ; geographical detector model

生态环境质量是社会经济可持续发展的基础^[1]。推进生态优先,实施生态系统保护,推动人与自然和谐发展,是亟待解决的问题。我国西北干旱地区生态基础脆弱,变化环境及日益频繁的人类活动,使得生态环境明显退化^[2]。玛依湖保护区是我国西北干旱地区珍贵的湖泊湿地生态系统,地处克拉玛依市绿洲区与古尔班通古特沙漠的过渡带,是克拉玛依市东部重要生态屏障和玛纳斯河下游重要的生态单元^[3-4]。中华人民共和国成立后,流域上游农业生产等经济用水挤占生态用水,导致河道断流,下游湿地退化和消亡,加之玛依湖保护区内及周边油气开采井场密度的增加,使得部分生态功能区退化,修复其生态环境刻不容缓^[5]。鉴于玛依湖保护区特殊的地理位置和生态作用,探究其生态环境质量时空变化特征,分析驱动因素,对保护区核心区和缓冲区的设立、生态修复和推动生态文明建设具有重要意义。

20 世纪 60 年代,国外学者开始对生态环境质量进行评估与分析,近年来,随着 3S 技术的发展与进步,生态环境质量评价手段趋于多元化^[6]。我国学者基于植被覆盖度^[7]、水体指数^[8]和地表温度^[9]等单一指标从不同维度对区域生态环境质量进行了评价研究,然而单一指标难以全面评价复杂的生态系统。2013 年,徐涵秋^[10]基于遥感技术,提出遥感生态指数(RSEI),该指数无人权重设定,能够快速、定量、客观地评价区域生态环境。此后,RSEI 在国内相关保护区生态环境质量评价中取得了众多成功应用,褚馨德等^[11]、王士远等^[12]、杨绘婷等^[13]分别将 RSEI 应用于我国祁连山国家自然保护区、长白山自然保护区和武夷山国家自然保护区的生态质量变化评价中。

当前,关于生态环境质量影响因素的分析上,大多为定性研究,也有应用相关分析和回归模型等方法定量分析地形、气候和降水等因素的影响^[1,14]。不管是定性研究还是定量分析,都忽略了影响因素

之间的交互作用对生态环境质量额外的解释力。因此,近年来众多学者引用地理探测器模型,快速有效地揭示了单一因素及不同因素之间的交互作用,对生态环境质量空间分异的驱动力^[15]。

目前,国内外学者大多针对玛依湖保护区土壤盐渍化^[16]和生物多样性^[4,17]等单一指标进行分析评价,难以反映区域整体生态特征。本研究以干旱内陆河典型流域—玛依湖保护区为对象,构建遥感生态指数,借助 Mann-Kendal 检验确定 RSEI 演化的时间节点,从而获取研究期间的典型年份,引入空间自相关分析与地探测器模型,分析生态环境质量的空间相关性,探究驱动生态环境质量变化过程空间异质性的关键因素,以期为实现玛依湖保护区生态环境可持续发展提供理论支持与决策依据。

1 研究区概况

玛依湖保护区(85°7′—85°26′E,45°14′—45°35′N)是新疆克拉玛依市的市级保护区,位于克拉玛依市东南部、玛纳斯河下游古河道区,湖区下游为玛纳斯河尾间湖—玛纳斯湖^[17]。区内包括上湖区、中湖区和下湖区(图 1)。其中上湖区水源来自上游玛纳斯河上的夹河子水库下泄;中湖、下湖区的水源主要是克拉玛依市的城市外排中水,年排放量约为 $0.49 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[4]。

该区域位于中纬度内陆地区,属于典型的温带大陆性气候,年平均气温为 8.6℃,最低温度低至 -40.5℃,最高温度可达 46.2℃,年降水量 108.9 mm,年蒸发量 1 492.0 mm。区内大部分为沙漠或荒漠,土质较低劣、土壤含盐量高,部分区域泉水溢出、土壤条件好,保护区内生长着各种荒漠植被以及湿生植物类群。在保护区中央分布着大大小小的湿地,是生物多样性的极重保护对象。

2 材料与方法

2.1 数据来源

遥感数据和 DEM 数据源于地理空间数据云

(<http://www.gscloud.cn>), 其中遥感数据包括 Landsat7ETM+、Landsat5TM 和 Landsat8OLI 数据。由于 2003 年、2004 年和 2012 年 Landsat7ETM+ 遥感影像数据有条带状缺失, 数据通过一元回归方法进行修复。选择的数据具体包括: 2000—2004 年和 2012 年的 Landsat7ETM+ 影像、2005—2011 年的 Landsat5TM 影像、2013—2020 年的 Landsat8OLI 影像。所有数据均集中在 7—8 月份植被生长旺盛且研究区云量小于 5% 的影像资料, 利用 envi5.3 软件对收集到的遥感影像数据进行辐射定标、大气校正、裁剪和拼接等预处理。土地利用数据采用 envi5.3 软件对 Landsat 影像数据监

督分类而得, 盐度通过波段运算而得^[6]。
玛纳斯河年径流量等水文数据来源于肯斯瓦特水文站, 玛依湖保护区气象数据采用最近的克拉玛依气象站点数据代替。

2.2 指数计算及突变检验方法

2.2.1 遥感生态指数计算 基于遥感技术, 通过主成分变换, 耦合集成绿度(NDVI)、湿度(WET)、干度(NDBSI)和热度(LST)4 个指标, 得到遥感生态指数。由于集成的这 4 个生态因子是自然生态系统的重要评价指标, 可以综合反映、定量刻画生态质量及其变化, 因此可以用来评价生态环境质量^[10]。4 个指标计算公式见表 1。

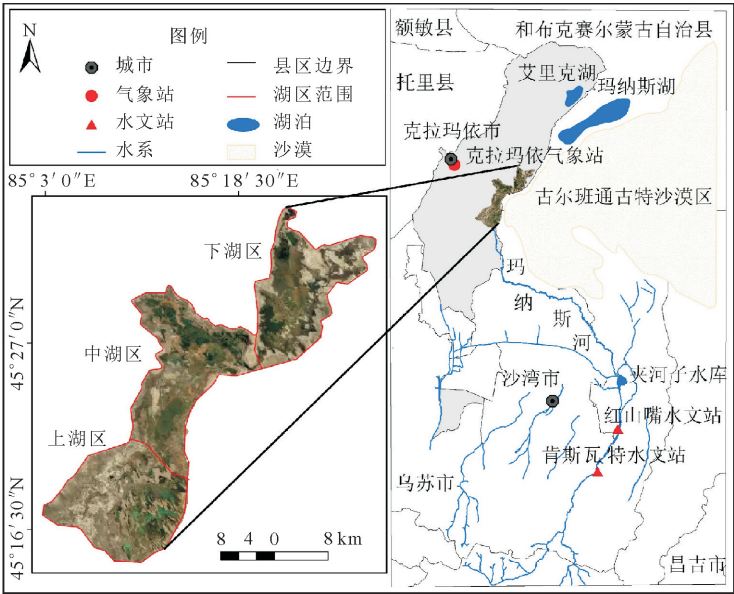


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

表 1 指标计算公式

Table 1 Calculation methods of indicators

指标类型	计算公式
NDVI	$N_{DVI} = \frac{B_4 - B_3}{B_4 + B_3}$
Wet	$W_{etETM+} = 0.2626B_1 + 0.2141B_2 + 0.0926B_3 + 0.0656B_4 - 0.7629B_5 - 0.5388B_6$ $W_{etTM} = 0.0315B_1 + 0.2021B_2 + 0.3012B_3 + 0.1594B_4 - 0.6806B_5 - 0.6109B_6$ $W_{etOLI} = 0.1511B_1 + 0.1973B_2 + 0.3283B_3 + 0.3407B_4 - 0.7117B_5 - 0.4559B_6$
LST	$L_{ST} = \frac{T}{1 + (\lambda T / \rho) \ln \epsilon} - 273.15$
NDBSI	$S_1 = [(B_5 + B_3) - (B_4 + B_1)] / [(B_5 + B_3) + (B_4 + B_1)]$ $I_{BI} = \frac{[2B_5 / (B_5 + B_4) - B_4 / (B_4 + B_3) - B_2 / (B_2 + B_5)]}{[2B_5 / (B_5 + B_4) + B_4 / (B_4 + B_3) + B_2 / (B_2 + B_5)]}$ $N_{DBSI} = (S_1 + I_{BI}) / 2$

注: B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 、 B_5 和 B_6 分别为蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、短波红外 1 波段、短波红外 2 波段的反射率; N_{DVI} 、 W_{et} 、 L_{ST} 、 S_1 、 I_{BI} 和 N_{DBSI} 分别为绿度指标、不同卫星传感器下的湿度指标、干度指标、土壤指数、建筑指数和干度指标; T 为热辐射强度转化的亮度温度, λ 为热红外波段中心波长, ρ 为常数, ϵ 为地表辐射率^[1,6,15]。

为了避免各个指标量纲的不统一, 对各个指标进行标准化处理, 然后利用主成分分析方法, 耦合 4 个指标, 得到第一主成分, 对第一主成分同样进行正

规化等处理得到遥感生态指数(RSEI)^[10]。主成分分析计算方法如下

$$R_{SEI0} = P_{C1} [F(N_{DVI0}, W_{et0}, L_{ST0}, N_{BSI0})] \quad (1)$$

$$R_{SEI} = \frac{R_{SEI0} - R_{SEImin}}{R_{SEImax} - R_{SEImin}} \quad (2)$$

式中: R_{SEI0} 为经主成分变换 (P_{Cl}) 后的初始遥感生态指数, N_{DVI0} 、 L_{ST0} 、 W_{et0} 和 N_{DBSI0} 为各个指标的正规化结果, R_{SEImin} 、 R_{SEImax} 和 R_{SEI} 分别为初始遥感生态指数的最小值、初始遥感生态指最大值和遥感生态指数。

2.2.2 Mann-Kendall 检验法 Mann-Kendall 突变检验法是被广泛应用于气象参数、水文序列的相关时间序列数据趋势检验方法, 具有排除异常值干扰的特点^[18]。因此, 本研究引入该方法对遥感生态指数均值展开趋势分析和突变性检验, 以获取遥感生态指数突变典型年份, 进行分段研究。具体方法详见参考文献[19]。

2.3 空间自相关分析

空间自相关是检验某一单元的特征属性和与其相邻单元的特征属性的相关程度, 以及揭示相互作用现象^[20]。本研究借助 Geado 软件, 根据遥感生态指数空间分布数据, 计算莫兰特指数 (Moran's I), 进行生态环境质量全局自相关分析以及局部自相关分析^[21]。

2.4 GDM 地理探测器

王峰劲等^[22]提出的地理探测器可用于探究空间分异性的驱动因素以及揭示各个因子之间的交互作用。本研究利用该方法中的因子探测和交互探测, 分析研究区内遥感生态指数驱动因子的影响力。具体计算公式如下

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (3)$$

式中: q 代表影响因子对遥感生态指数的解释力, $q \in [0, 1]$, q 越大影响因子对遥感生态指数的解释力越强, 即影响越大; N_h 和 N 分别代表区域 h 和全区域采样点数; σ_h^2 和 σ^2 分别代表区域 h 和全区域遥感生态指数的方差值; L 为候选因子分类数。

3 结果与分析

3.1 遥感生态指数时间变化特征

玛依湖保护区 RSEI 主成分分析等结果见表 2, 由表 2 可知, 2000—2020 年第 1 主成分贡献率均超过了 79%, 涵盖了研究区生态环境的大部分信息, 可用于构建 RSEI; NDVI 和 WET 荷载值 > 0 , 对 RSEI 有正向驱动作用, NDBSI 和 LST 荷载值 < 0 , 对 RSEI 起负向驱动作用, 符合客观事实, 说明构建的 RSEI 较为合理, 可用于评价玛依湖保护区生态环境质量变化。

RSEI 均值变化趋势见图 2(a), 图 2(a) 清晰显示 RSEI 均值总体上呈波动上升趋势, 结合表 2 可知: 在 2016 年和 2018 年达到了最大值, 为 0.48; 最小值年份出现在 2009 年, 为 0.28。

利用 Mann-Kendall 法对年序列 RSEI 均值进行突变性检验, 结果如图 2(b) 所示。图中 UF_K 曲线超过了 0.05 显著水平且与 UB_K 曲线在 0.05 显著水平内存在交点, 交点处于 2013 年, 表明 RSEI 均值在 2013 年存在有效突变点; UF_K 值在 2007—

表 2 主成分分析结果及 RSEI 均值

Table 2 Results of principal component analysis and mean RSEI

年份	NDVI	WET	NDBSI	LST	贡献率 (%)	RSEI 均值
2000	0.28	0.24	-0.39	-0.21	0.89	0.37
2001	0.28	0.21	-0.39	-0.21	0.86	0.38
2002	0.27	0.24	-0.38	-0.24	0.85	0.41
2003	0.31	0.27	-0.31	-0.39	0.90	0.41
2004	0.23	0.21	-0.23	-0.35	0.85	0.30
2005	0.24	0.25	-0.30	-0.36	0.85	0.36
2006	0.30	0.26	-0.38	-0.22	0.86	0.41
2007	0.26	0.23	-0.35	-0.18	0.86	0.32
2008	0.31	0.26	-0.38	-0.25	0.89	0.36
2009	0.28	0.24	-0.26	-0.22	0.87	0.28
2010	0.25	0.24	-0.34	-0.22	0.79	0.40
2011	0.32	0.27	-0.39	-0.29	0.92	0.41
2012	0.30	0.26	-0.29	-0.35	0.85	0.41
2013	0.32	0.25	-0.39	-0.16	0.92	0.42
2014	0.29	0.22	-0.38	-0.20	0.87	0.44
2015	0.25	0.20	-0.36	-0.16	0.84	0.38
2016	0.29	0.24	-0.34	-0.20	0.82	0.48
2017	0.35	0.28	-0.40	-0.25	0.92	0.47
2018	0.36	0.27	-0.38	-0.23	0.92	0.48
2019	0.26	0.27	-0.39	-0.24	0.85	0.41
2020	0.29	0.28	-0.38	-0.24	0.84	0.46

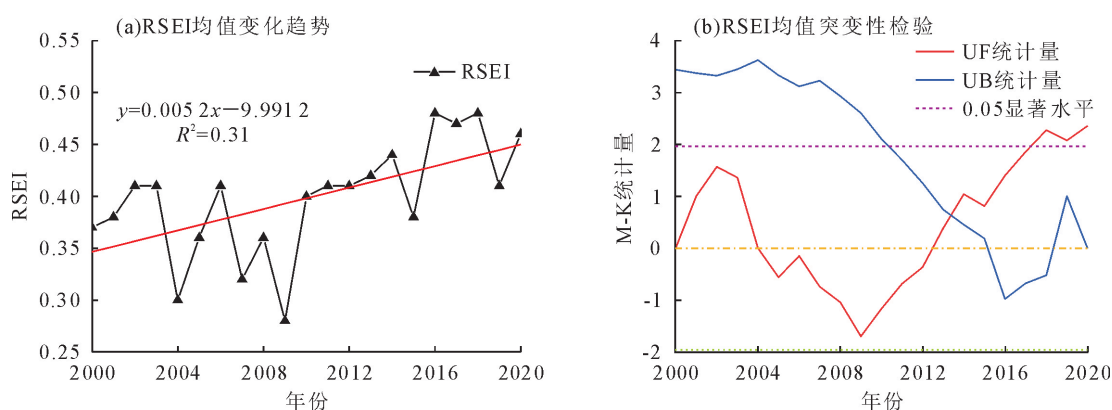


图 2 2000—2020 年玛依湖保护区 RSEI 年际变化趋势及突变性检验

Fig. 2 Annual variation trend and mutation test of RSEI in Mayi Lake Nature Reserve from 2000 to 2020

2012 年呈现负值,表明期间生态环境质量有下降趋势,且 RSEI 均值在 2009 年达到了最小值。因此结合年际 RSEI 均值变化趋势与 Mann-Kendall 突变性检验结果,选择 2000、2009、2013 年和 2020 年为典型年份,对玛依湖保护区生态环境质量时空变化情况进行分段分析。

3.2 遥感生态指数空间变化特征

3.2.1 遥感生态指数空间变化分析 根据参考文献分类标准^[19],对 RSEI 进行等级划分,并对面积占比分别进行统计,如图 3 所示。

从图 3 可知,整个研究期间,生态环境质量等级为“差”的区域所占比例最大,大多分布于湖区四周的荒漠地带;等级为“较差”的区域所占比例由 2000 年的 11.75% 逐年下降至 2020 年的 7.71%,主要分布在等级差和等级中的过渡区域,处于湖区的边缘;等级为中等的区域所占比例呈增长趋势,特别是由 2013 年的 12.20% 增长至 2020 年的 21.46%;等级为良的区域所占比例在 12% 上下浮动,变化幅度不

大;等级为优的区域主要分布在湖区中央,植被生长旺盛的地区,历年所占比例分别为 14.22%、4.75%、20.34% 和 18.19%,呈现波动上升趋势。

3.2.2 生态环境质量动态变化分析 为了进一步分析保护区 2000—2020 年生态环境质量时空变化情况,对研究区遥感生态指数进行差值变化检测,结果见图 4 和表 3,由图 4 和表 3 可知:2000—2009 年,生态环境恶化和变差的面积合计 69.04 km²,占比 19.16%,主要分布在下湖区和中湖区;2009—2013 年,生态环境质量恶化和变差的面积合计 3.8 km²,占比 1% 左右,生态环境质量变好的面积合计 188.35 km²,占比 52.28%,说明整个保护区生态环境质量得到极大改善;2013—2020 年,生态环境质量变好和优化的面积占比维持在 50% 左右,说明整个区域生态环境质量稳定向好发展;从 2000—2020 年,生态环境质量优化和变好面积占比超过 60%,远超生态环境质量恶化和变差面积占比总和,说明近 20 a 来保护区生态环境质量有变好的趋势。

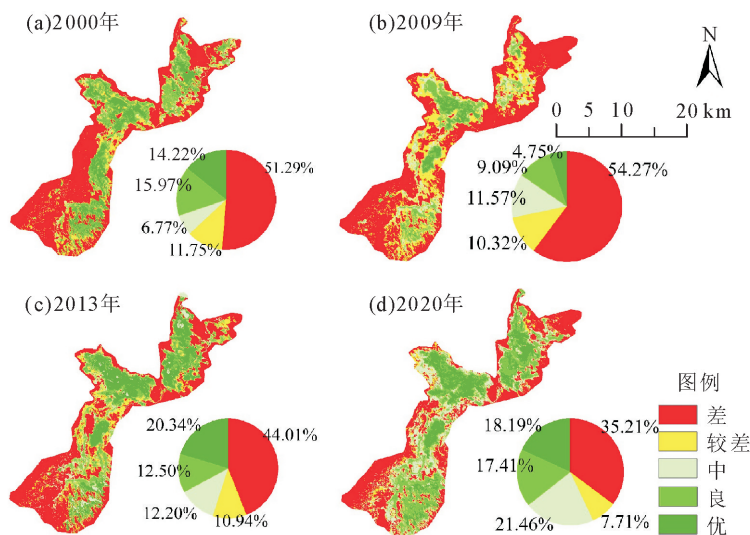


图 3 RSEI 等级分布

Fig. 3 Distribution of RSEI

下湖区和中湖区的水源主要来自克拉玛依市城市外排中水,后期下湖区和中湖区生态环境质量的改善,可能与克拉玛依市经济的发展、外排中水量的增加有关,进而改善保护区的湿度条件以及植被生长环境,生态环境得到恢复^[17];同时 2017 年以来,克拉玛依市政府开展了玛依湖保护开发行动计划,促进了后期整个区域生态环境质量稳步发展^[23]。

3.3 遥感生态指数空间自相关分析

为了更好地了解生态环境质量的时空变化和空间分异特征,基于研究区实际情况,同时为保证尺度内信息的完整性和定量评价的准确性,采用 300 m×300 m 网格进行图像重采样,从每个图像中收集的 4 005 样本点,借助 Geoda 软件,进行空间自相关分析。结果显示, Moran's I 散点基本汇集在一、三象限,全局 Moran's I 值分别为:0.64,0.70,0.66 和 0.71,均大于0,且都通过 $P=5\%$ 显著性检验,说明

表 3 玛依湖保护区 2000—2020 年 RSEI 面积变化

Table 3 RSEI area change of Mayi Lake Nature Reserve from 2000 to 2018

RSEI 变化等级	2000—2009 年		2009—2013 年		2013—2020 年		2000—2020 年	
	面积/km ²	占比(%)	面积/km ²	占比(%)	面积/km ²	占比(%)	面积/km ²	占比(%)
恶化	13.11	3.64	0.22	0.06	2.56	0.71	4.00	1.11
变差	55.93	15.52	3.58	0.99	12.42	3.45	14.85	4.12
不变	169.70	47.10	86.53	24.02	135.78	37.69	104.92	29.12
变好	106.91	29.68	188.35	52.28	172.85	47.98	162.99	45.24
优化	14.62	4.06	81.61	22.65	36.68	10.18	73.51	20.40

各年研究区内 RSEI 具有一定的空间正相性,存在集聚效应,同时全局 Moran's I 值呈现先上升后下降再上升的趋势,说明后期集聚效应逐渐增强。

进一步对玛依湖保护区生态环境质量进行局部自相关分析,得到局部自相关 LISA 聚类图(图 5),从图 5 可知,2000—2020 年,低-低聚集区大多分布在保护区外围,所在区域荒漠化程度高,生态脆弱,生态环境质量差;高-高聚集区面积呈现波动上涨,主要集中在保护区湖区中央,该区域为保护区的核心区域,水资源条件较好,植被覆盖度高,植被净生产力较强。

3.4 驱动因素分析

应用地理探测器 GDM 进一步揭示生态环境质量变化的主要因素。具体操作步骤如下,将监测年份的指标图像重新采样为 300 m×300 m,并在每个图像中生成 4 005 个点;以 RSEI 为自变量,并选取 8 个指标作为因变量;通过将 RSEI 点与 8 个指标因子(NDVI、WET、NDBSI、LST、盐度、土地利用、高程、坡度)进行因子检测和交互检测分析。

3.4.1 因子探测分析 因子探测结果表明,8 个探测因子均在 1% 水平上显著相关,表明所选的探测

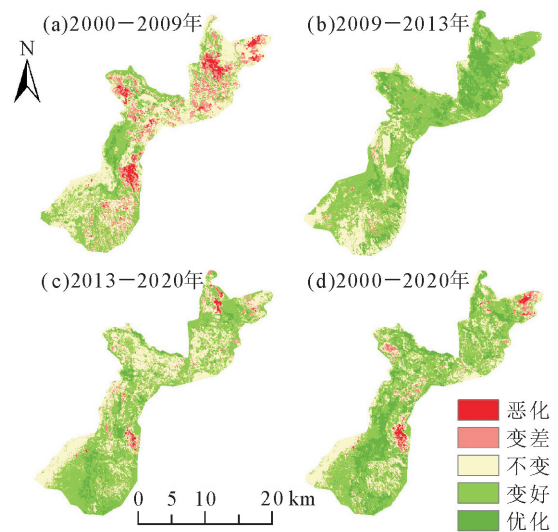


图 4 玛依湖保护区 2000—2020 年 RSEI 变化检测

Fig. 4 RSEI change detection in Mayi Lake Nature Reserve from 2000 to 2018

因子对 RSEI 的空间分异特征均有显著影响。单因子探测结果见表 4。

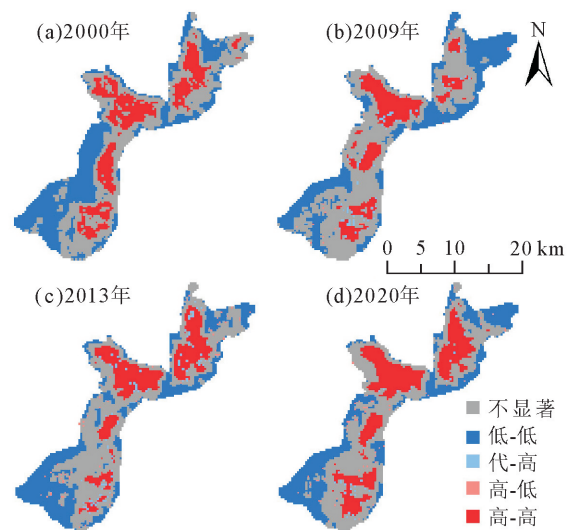


图 5 玛依湖保护区 2000—2020 年 RSEI 的 LISA 聚类图

Fig. 5 The LISA cluster map of RSEI in Mayi Lake Nature Reserve from 2000 to 2020

由表 4 可知,历年 4 个模型因子都体现出对生态环境质量空间分异特征有较强的解释力,综合来

看,其中最强的为干度(NDBSI),最弱的为热度(LST),湿度(WET)和绿度(NDVI)解释力相当,介于绿度(NDVI)和热度(LST)之间;地形因子坡度和高程,从历年排序来看,两者解释力都较弱;盐度因子相对于地形因子解释力明显更强。

总体上看,各个因子历年排序变化不大,而土地利用的 q 不断增大,排序由第5上涨至第2,说明土

地利用对研究区的生态环境质量分异性影响在增强,是影响生态环境质量变化的重要因素。

3.4.2 交互作用探测分析 为了进一步分析任意2个影响因子共同作用后对RSEI空间分布的解释程度,对各因子进行交互探测。将玛依湖保护区历年RSEI与8个因子进行交互探测共产生36项交互作用结果。

表 4 单因子探测结果

Table 4 Results of individual factor detection

探测因子	2000 年		2009 年		2013 年		2020 年	
	q	排序	q	排序	q	排序	q	排序
NDVI	0.800	3	0.873	2	0.877	2	0.776	4
WET	0.839	2	0.852	3	0.849	3	0.847	2
NDBSI	0.925	1	0.880	1	0.946	1	0.952	1
LST	0.792	4	0.764	5	0.795	5	0.762	5
盐度	0.654	6	0.696	7	0.789	6	0.748	6
土地利用	0.748	5	0.797	4	0.821	4	0.847	2
高程	0.061	7	0.071	6	0.098	7	0.088	7
坡度	0.007	8	0.009	8	0.001	8	0.003	8

注: q 表示对RSEI空间分异特征的解释力。

由探测结果图6可知,相比单因子,双因子的交互作用增强了对生态环境质量的解释力,更能促进玛依湖保护区生态环境质量的变化。其中,历年所有双因子交互作用结果中,绿度和干度交互结果 q 均达到最大,对保护区生态环境质量变化影响最大;虽然

2个地形因子解释力十分弱,但与其他因子的共同作用下表现出的非线性增强效果显著,说明地形因子是影响生态环境质量的间接因素;除去模型因子之间交互作用结果后,土地利用与干度交互作用影响力最大,且在4个年份因子交互结果中也均为最大。

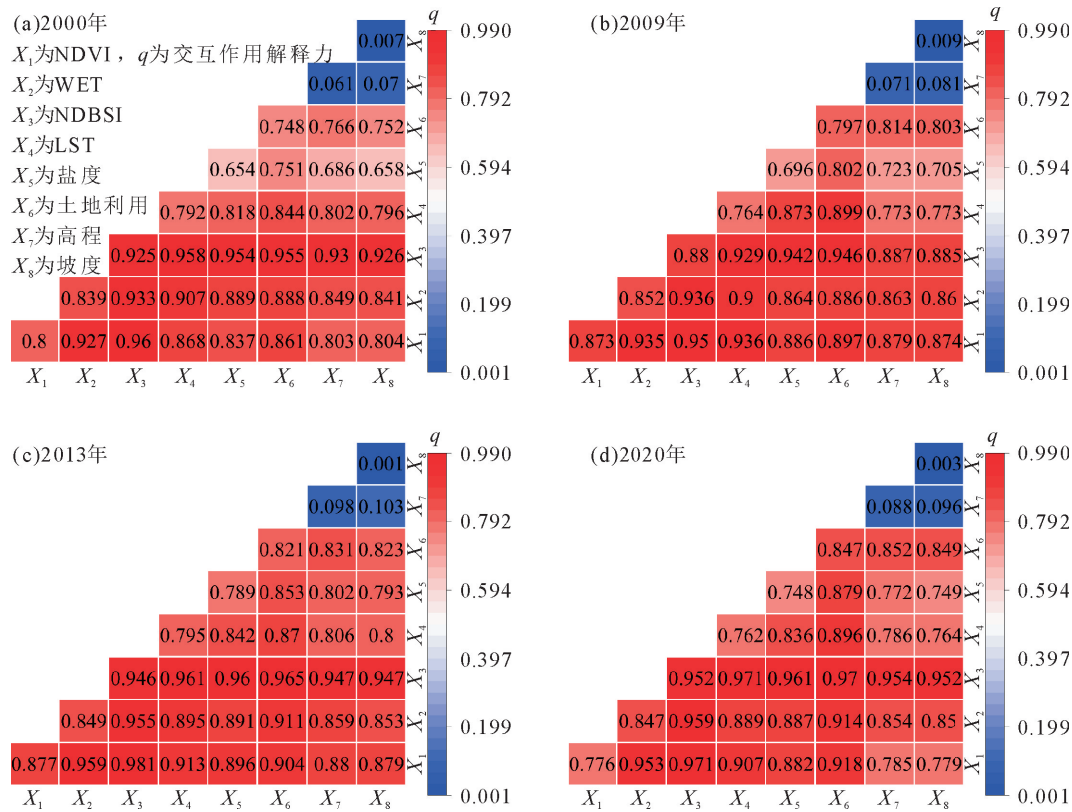


图 6 双因子交互作用结果

Fig. 6 Two-factor interaction results

结合单因子检测结果,2000—2020年,绿度、干度和土地利用对保护区生态质量变化影响效果均较为显著,特别是土地利用因子的解释力在逐年增强,近年来,人类活动改变了保护区土地利用状况,在保护区内拦河建堤蓄水,草地、湿地植被生长越发旺盛,生态环境质量改善^[23];而勘探和开采石油,少部分区域植被破坏、地表裸露,干化严重,进而改变了局部区域生态环境质量^[24]。

3.4.3 生态环境质量变化对自然因素和人类活动的双重响应 湿度(WET)和绿度(NDVI)作为生态

环境质量评价的组成部分,直接影响着生态环境质量的优劣。从时间上看,由图7(a)可以看出,1990—2020年,玛纳斯河径流量的增长以及保护区降水的增加一定程度上改善了保护区的土壤湿度条件;人类活动对生态环境质量的影响不仅表现在土地利用的变化上,同时也影响着流域内水资源的分配,从图7(b)可以看出,夹河子水库历年泄水量波动较大,由于保护区植被生长水源主要来源于夹河子水库生态输水,而年际生态环境质量出现波动,可能与保护区上游夹河子水库历年生态输水水量不稳定有关。

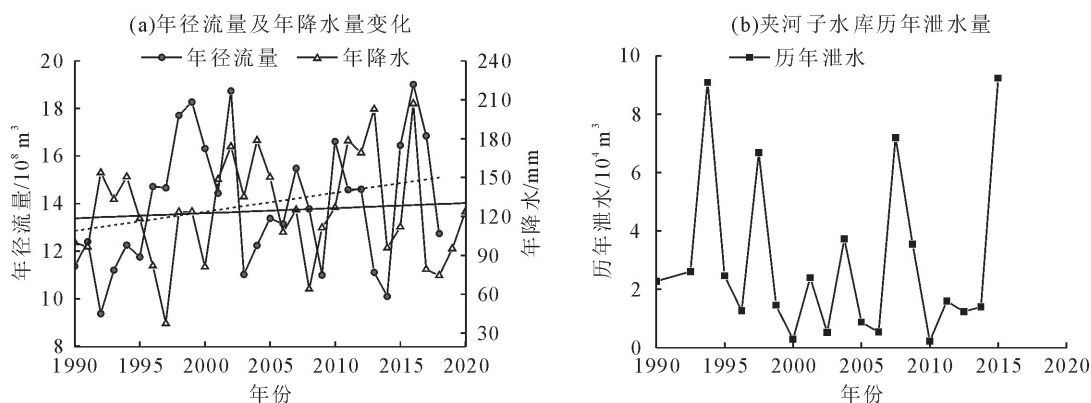


图7 玛纳斯河年径流量及玛依湖年降水量变化与夹河子水库历年泄水量变化

Fig. 7 Annual runoff of Manas River, annual precipitation of Mayi Lake and discharge of Jiahezi Reservoir

4 讨论

4.1 评价指标合理性分析

2000—2020年,各数据的第1主成分贡献率超过了78%,绿度和湿度的荷载值呈现负值,具有正向驱动力,干度和温度的荷载值呈现负值,起负向驱动力,符合实际,说明构建的遥感生态指数可以用于评价玛依湖保护区生态环境质量变化。

4.2 玛依湖保护区与下游玛纳斯湖的生态用水矛盾

玛依湖保护区中,生态环境质量较好的高-高聚集区域多集中在保护区中央,该区域水资源状况较好,芦苇(*Phragmites australis*)等植被生长旺盛,进而表现出生态环境质量较高。干旱地区水分条件是植被生长的决定性因子,而玛依湖保护区近年来在各类水源的补给下,特别是克拉玛依工业园区外排中水对下湖区和中湖区的影响,一定程度提高了湖区水资源状况。然而,近年来随着流域生态环境治理力度的加强,禁止园区排放中水,未来该区域植被有退化的风险。未来,湖区主要水源将来自玛纳斯河上游夹河子水库下泄,而保护区内拦河建堤增加湖区储存水量的同时,也破坏了流域的河湖连通性,影响湖区下游玛纳斯湖的入湖水量,玛纳斯湖及其周边生态环境恐受影响。

玛依湖保护区生态环境质量变化是人类活动和自然因素共同作用的结果,因此,未来在流域环境治理背景下,需加大对生态修复的投入,以削弱由于保护区水源减少和土地利用改变带来的不利影响,特别是针对保护区开展稳定的生态输水,协调与玛纳斯湖的生态用水矛盾,以维持保护区基本的生态功能,促进经济与生态的和谐发展。

5 结论

基于2000—2020年序列的玛依湖保护区遥感数据,构建遥感生态指数(RSEI),对长时间序列的遥感生态指数均值进行突变检测,进而分段研究生态环境质量的时空变化特征,引入空间自相关分析方法和地理探测器,探讨了生态环境质量的空间相关性和驱动因素。

整个研究期间遥感生态指数均值呈波动上升趋势,其中最小值为2009年0.28;对其进行突变检验结果表明,2013年要遥感生态指数均值发生了突变;以2000、2009、2013年和2020年为典型年份,进行分段研究表明,总体上玛依湖保护区生态环境质量空间上呈现“中间高、四周低”的格局;虽然在2000—2009年,上湖区和下湖区生态环境质量出现恶化,但从总体上看,近20a来保护区生态环境质量得到了改善。

从全局莫兰特指数(Moran's I)分析表明,玛依湖保护区中生态环境质量的空间分布是聚类的,而不是随机的。低-低聚集区域主要分布在保护区四周,而高-高聚集区域主要集中在湖区中央,并且近 20 a 来高-高聚集区域面积有扩张的趋势。

地理探测器(GDM)的结果揭示了 4 个模型因子中干度(NDBSI)、绿度(NDVI)为玛依湖保护区生态环境变化的主要驱动因子,而保护区土地利用的改变对生态环境质量影响越来越大,说明人类活动对生态环境质量变化影响越发显著。

参考文献:

- [1] 曹辰,杨国林,锁旭宏,等.基于遥感生态指数的阜新市生态环境变化分析[J].西北林学院学报,2022,37(2):200-207.
CAO C, YANG G L, SUO X H, *et al.* An analysis of ecological environment change in Fuxin city based on the remote sensing ecological index[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 200-207. (in Chinese)
- [2] 孙权,张显峰,江森.干旱区生态环境敏感参量遥感反演与评价系统研究[J].北京大学学报:自然科学版,2011,47(6):1073-1080.
SUN Q, ZHANG X F, JIANG M. Eco-environmental variables estimation from remotely sensed data eco-environmental assessment: Models and System[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(6): 1073-1080. (in Chinese)
- [3] 尚白军,郑博文,周智彬,等.克拉玛依市玛依湖区不同土壤条件的植被生长状况及影响因子[J].东北林业大学学报,2021,49(2):44-49.
SHANG B J, ZHENG B W, ZHOU Z B, *et al.* Vegetation growth and its influencing factors under different soil conditions in Mayi Lake area of Kelamayi city[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(2): 44-49. (in Chinese)
- [4] 王述潮,马鸣.新疆克拉玛依市玛依湖区的鸟类多样性[J].湿地科学,2019,17(2):172-178.
- [5] 范聚柳,吴焱,焦黎.近 30 年来新疆玛纳斯湖湿地生态系统服务价值变化及其驱动力分析[J].海洋湖沼通报,2021(1):48-55.
- [6] 张洁,杨燕琼.珠江三角洲城市群生态状况变化遥感评价[J].西北林学院学报,2019,34(1):184-191.
ZANG J, YANG Y Q. Remote sensing evaluation on the change of ecological status of Pearl River delta urban agglomeration[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(1): 184-191. (in Chinese)
- [7] 周沙,黄跃飞,王光谦.黑河流域中游地区生态环境变化特征及驱动力[J].中国环境科学,2014,34(3):766-773.
- [8] 任鹏飞,甘淑,谢显奇,等.基于 ETM⁺ 遥感探测山地城市不透水面及其动态分析[J].水土保持通报,2013,33(5):109-112,160.
- [9] 郑慧祯,陈燕红,潘文斌,等.河口湿地表面温度扰动特征及其关键影响因素[J].生态学杂志,2018,37(8):2463-2473.
- [10] 徐涵秋.水土流失区生态变化的遥感评估[J].农业工程学报,2013,29(7):91-97,294.
- [11] 褚馨德,贾伟,张峻豪,等.基于 RSEI 模型的祁连山自然保护区生态环境质量评价[J].环境监测管理与技术,2022,34(1):38-42.
- [12] 王士远,张学霞,朱彤,等.长白山自然保护区生态环境质量的遥感评价[J].地理科学进展,2016,35(10):1269-1278.
- [13] 杨绘婷,徐涵秋.基于遥感空间信息的武夷山国家级自然保护区植被覆盖度变化与生态质量评估[J].应用生态学报,2020,31(2):533-542.
YANG H T, XU H Q. Assessing fractional vegetation cover changes and ecological quality of the Wuyi Mountain national nature reserve based on remote sensing spatial information[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(2): 533-542. (in Chinese)
- [14] 李婷婷,马超,郭增长.基于 RSEI 模型的贺兰山长时序生态质量评价及影响因素分析[J].生态学杂志,2021,40(4):1154-1165.
LI T T, MA C, GUO Z Z. Ecological quality evaluation and influencing factors analysis of Helan Mountain based on RSEI[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 1154-1165. (in Chinese)
- [15] 高焕霖,张廷龙,樊华焯,等.基于地理探测器的杨凌示范区生态环境质量影响因素定量分析[J].西北林学院学报,2020,35(5):185-194.
GAO H L, ZHANG T L, FAN H Y, *et al.* Quantitative analysis of the factors affecting ecological environment quality in Yangling Demonstration Zone based on geographical detector[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 185-194. (in Chinese)
- [16] 尚白军,郑博文,周智彬,等.新疆玛依湖区土壤盐渍化过程中土壤粒径分形特征[J].云南大学学报:自然科学版,2020,42(5):896-905.
- [17] 马占仓,刘建,张欢,等.新疆玛依湖保护区被子植物区系与多样性特点[J].石河子大学学报:自然科学版,2021,39(3):346-351.
- [18] 汪东川,陈星,孙志超,等.格尔木长时间序列遥感生态指数变化监测[J].生态学报,2022,42(14):5922-5933.
WANG D C, CHEN X, SUN Z C, *et al.* Monitoring of changes in the ecological index of long-time sequence remote sensing in Golmud, Qinghai Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5922-5933. (in Chinese)
- [19] 李瑞雪,张明军,金爽,等.乌鲁木齐河流域气候变化的区域差异特征及突变分析[J].干旱区地理,2010,33(2):243-250.
- [20] 张海峰,白永平,陈琼,等.基于 ESDA-GIS 的青海省区域经济差异研究[J].干旱区地理,2009,32(3):454-461.
- [21] LI X M, JIN P Y. Characteristics and spatial-temporal differences of urban human settlement environment in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(5): 521-529.
- [22] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [23] 油城新闻.玛依湖保护开发行动计划[N].克拉玛依日报,2017-06-23(A03).
- [24] 高亮.准噶尔盆地金龙 2 井区块二叠系上乌尔禾组沉积储层研究[D].北京:中国石油大学(北京),2016.